

MODELO ESTOCÁSTICO PARA GENERAR VARIABLES ATMOSFÉRICAS DIARIAS. APLICACIÓN A SALAMANCA Y OPORTO

Fernando de Pablo Dávila⁽¹⁾, Santiago Domínguez Martín⁽²⁾, Luis Rivas Soriano⁽¹⁾ y Clemente Tomás Sánchez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. Plaza de los Caídos s/n Ed. Trilingüe 37008, fpd123@usal.es ljs@usal.es cts50@usal.es

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales. Universidad de Salamanca. Filiberto Villalobos 119-129 37007, a37050@usal.es

Introducción

En vista de los posibles cambios climáticos que se preveen en un futuro próximo, se vienen realizando importantes esfuerzos en el estudio de las influencias que estos cambios provocarán en varios campos de la actividad humana, tales como la agricultura, salud o hidrología entre otros, que son significativamente dependientes de la variabilidad atmosférica o climática (Annandale et al., 1999; Williams et al., 2001; Cubasch et al., 2001). Uno de los métodos a utilizar para disponer de un conocimiento preciso de los cambios previstos, puede basarse en el empleo de modelos de simulación capaces de generar series a largo plazo de variables atmosféricas diarias que, mostrando alta correspondencia con las variables atmosféricas observadas, sirvan para evaluar la variabilidad futura de un lugar o zona y su adaptación a los cambios.

Desde hace algunos años vienen siendo utilizados modelos matemáticos deterministas capaces de simular series temporales de variables atmosféricas de largo plazo y son denominados generadores estocásticos o *Weather Generator* (Richardson and Wright, 1984; Semenov and Jamieson, 1999). Estos modelos utilizan datos históricos observados como “inputs” y generan datos sintéticos de variables atmosféricas estadísticamente similares a los registros observados y a muy largo plazo. El problema surge al intentar confirmar que los datos generados de esta forma representan adecuadamente las condiciones de los cambios climáticos esperados.

El objetivo último de los *Weather Generator* es producir series temporales de variables que presenten una estructura estadística similar a la de las series observadas u originales. En el desarrollo de estos “generadores”, se debe seleccionar un modelo inicial adecuado que represente la distribución correcta de las variables atmosféricas utilizadas, además de determinar las relaciones existentes entre estas variables y su variabilidad temporal. Los modelos autoregresivos ARIMA y

cadena de Markov de primer orden o superiores son los frecuentemente utilizados para estos propósitos (Katz, 1977; Richardson, 1981). Los parámetros obtenidos por el modelo-generador son deducidos a partir de las series observadas de un lugar mediante la utilización de valores con una longitud temporal suficiente, o bien pueden ser deducidos a partir de distribuciones geográficas con características climáticas relevantes (para aquellos lugares sin disponibilidad de datos históricos observados). Una vez que la parametrización del modelo se ha realizado y obtenida la ecuación correspondiente, puede generarse un conjunto arbitrario de variables atmosféricas modificadas que posteriormente puedan ser adaptadas a los posibles escenarios climáticos previstos en la región.

Datos y resultados

El propósito de este trabajo es analizar y chequear la utilización de un generador estocástico de series atmosféricas diarias, como es el ClimGen (versión 4.1, Stöckle et al., 2001) en dos localidades diferentes de la Península Ibérica: Salamanca (40.95°N 5.5°W, 793m de altitud) y Oporto (41.23°N 8.68°W, 69m de altitud). Los requisitos necesarios para la correcta aplicación de este tipo de modelos se basan en disponer de, al menos, 10 años de datos diarios reales de temperatura, 25 años de valores de precipitación y al menos 5 años de radiación solar o su equivalente. Por ello hemos partido de observaciones diarias realizadas en ambas localidades durante el periodo 1973-2008, de las variables Temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn), Precipitación (Pr), Radiación solar (Rs) o su equivalente (número de horas de Sol de cada día convertidas en radiación solar utilizando el método sugerido por Angström) y Velocidad del viento (Vv) en módulo, fueron generadas series diarias de estas mismas variables primeramente para el periodo de referencia y posteriormente fue realizada una proyección futura de estas mismas variables para el periodo 2009-2019. Las distribuciones obtenidas fueron comparadas mediante el test de χ^2 y los

valores de la media y varianza fueron comparados con las pruebas t-Student y F-Snedecor, respectivamente.

En la tabla 1 podemos ver de forma comparada los resultados obtenidos para las dos localidades, entre las series medidas u observadas y las generadas utilizando el modelo ClimGen, distribuidas por meses. El grado de correspondencia entre las distintas series es excelente, fluctuando entre un valor mínimo del coeficiente de correlación de 0.87 y un valor máximo de 0.98. Las características estadísticas básicas de las series diarias originales han sido bien preservadas en las series sintéticamente generadas. Así, los ciclos anuales entre ambos tipos de series muestran una clara correspondencia en la forma, las variables Tx y Tn presentan distribuciones aproximadamente normales (Gaussianas) tal como exige la asunción de modelo autoregresivo (AR), la distribución de los periodos húmedos (días con lluvia) está satisfactoriamente representada por una cadena de Markov de primer orden y la cantidad de precipitación diaria puede ser representada por una distribución Gamma, aunque esta distribución subestima la ocurrencia de los eventos extremos (alta y baja precipitación) para la mayoría de los meses en ambas localidades.

Por otro lado, algunas características no son bien “recogidas” por el modelo generador, así por ejemplo las series diarias de radiación solar (Rs) no presentan una adecuada distribución normal como exige la condición de proceso autoregresivo, la correlación existente entre las series Tx, Tn y Rs (sin desfase y con lag-1) varía a lo largo del año, lo que contradice también alguna consideración del proceso autoregresivo, la distribución de los periodos secos (días sin lluvia) no es modelizada satisfactoriamente por la cadena de Markov de orden uno, siendo subestimados por el modelo generador; la variabilidad de las medias mensuales de las temperaturas máxima (Tx) y mínima (Tn) es sobrestimada mayoritariamente durante todo el año (Figura 1 y 2), si bien de forma más significativa para la Tx. La variabilidad mensual de la radiación solar (Rs) y del módulo de la velocidad del viento (Vv) están subestimadas en las épocas otoñales e invernales y sobrestimadas en las épocas del verano.

Como el objetivo final en el desarrollo y utilización de estas herramientas estadísticas consistirá en verificar si el modelo es capaz de “predecir” un conjunto de variables atmosféricas para las localidades analizadas, de forma coherente y significativa, conservando las características inherentes a las series originales. Para ello hemos realizado una proyección hacia adelante del “*Weather Generator*” utilizado (ClimGen) obteniendo datos diarios sintéticos de algunas variables para el periodo 2009 – 2019. En las

Figuras 3 y 4 mostramos la evolución para el año 2009 de las variables Tx, Tn y Pr entre las series generadas por el modelo y las observadas o medidas, obteniendo coeficientes de correlación de 0.65, 0.69 y 0.47 para Salamanca y 0.60, 0.65 y 0.43 para Oporto respectivamente. Puede deducirse que el grado de ajuste entre las series es significativo para las temperaturas extremas de ambas localidades y ligeramente inferior para la variable precipitación. Si analizamos la evolución anual generada por el modelo a lo largo del periodo 2010-2019 para las mismas tres variables (Figuras 5 y 6) mediante sus anomalías (valores centrados alrededor de su media), podemos deducir como aspecto más importante que no se detecta ninguna tendencia positiva o negativa a largo plazo, ni en las temperaturas máximas o mínimas ni en la precipitación en ese periodo. Se observa una variabilidad interanual típica para ambas localidades, alternándose años ligeramente más cálidos y lluviosos con otros ligeramente más fríos y secos. Los incrementos o decrementos anuales máximos esperados, en las temperaturas serán del orden de ± 0.6 °C y para la precipitación de ± 25 mm.

Finalmente y como motivo de análisis futuro, si asumimos que este tipo de modelos estocásticos pueden ser aceptados como significativamente válidos para la generación de variables atmosféricas a largo plazo en un lugar o zona determinada, deberemos plantearnos primeramente si sus “predicciones” están o no de acuerdo con las previstas por el IPCC (para escalas regionales) y en caso contrario asumir como escenarios meteorológicos y climáticos otros posibles, a partir de los cuales realizar una planificación agrícola, social o hidrológica más acorde con los resultados de índole local obtenidos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la AEMET en España y al IMP de Portugal por la cesión de los datos y a la Junta de Castilla y León por la financiación parcial concedida.

Referencias

Annandale, J.G., Jovanovic, N.Z., Benadé, N., Tanner, P.D. 1999. Modelling the long term effect of irrigation with gypsiferous water on soil and water resources. *Agric. Ecosys. Environ.* **76**, 109–119.

Cubasch, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., Stouffer, R.J., Dix, M., Noda, A., Senior, C.A., Raper, S., Yap, K.S., 2001. Projections of future climate change. In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.I. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 525–582.

Katz, R.W. 1977, Precipitation as a Chain-Dependent Process, *J. Appl. Meteorol.* **16**, 671–676.

Richardson, C.W. 1981, Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation, *Water Resour. Res.* **17**, 182–190.

Richardson, C. W. and Wright, D. A. 1984, *WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, p. 88.

Semenov, M.A., Jamieson, P.D., 1999. Using weather generators in crop modelling. In: CLIMAG Geneva Workshop, Geneva, Switzerland, September 28–29, 1999.

Stöckle, C.O., Nelson, R., Donatelli, M., Castellvi, F., 2001. ClimGen: a flexible weather generation program. In: Proceedings of the Second International Symposium on Modelling Cropping Systems, July 16–18, 2001, Florence, Italy, pp. 229–230.

Williams, A.N., Nearing, M., Habeck, M., Southworth J., Pfeifer, R., Doering, O.C., Lowenberg-Deboer, J., Randolph, J.C., Mazzocco, M.A., 2001. Global climate change: implications of extreme events for soil conservation strategies and crop production in the Midwestern United States. In: Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (Eds.), Proceedings of the Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting on Sustaining the Global Farm, Purdue University, Indiana, pp. 509–515.

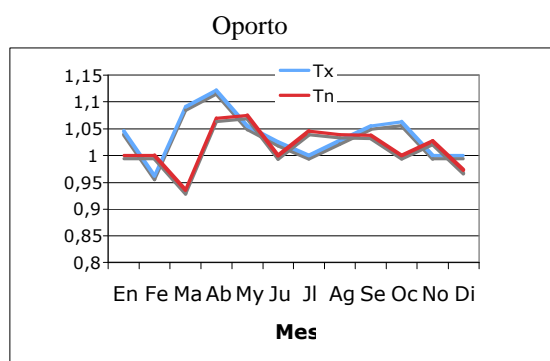
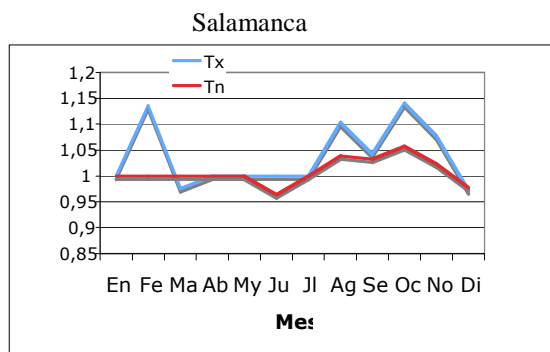


Figura 1. Ratio mensual de la desviación estándar generada vs observada de las temperaturas extremas, para Salamanca y Oporto.

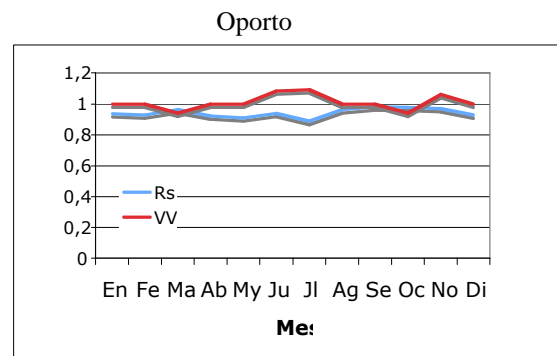
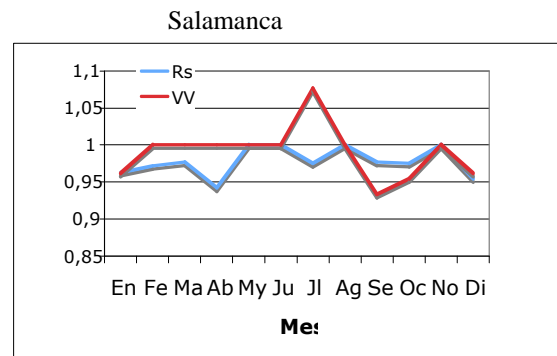


Figura 2. Ratio mensual de la desviación estándar generada vs observada de la radiación solar y velocidad del viento, para Salamanca y Oporto.

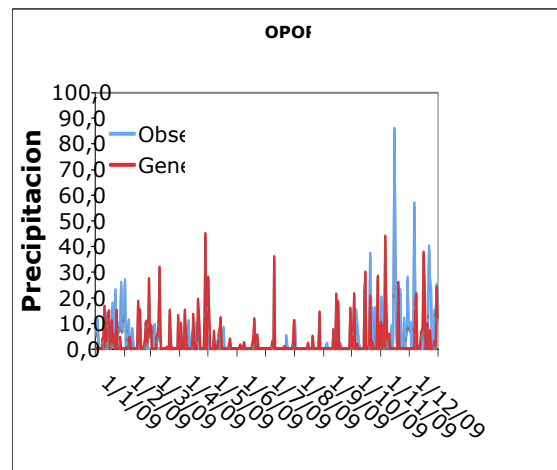
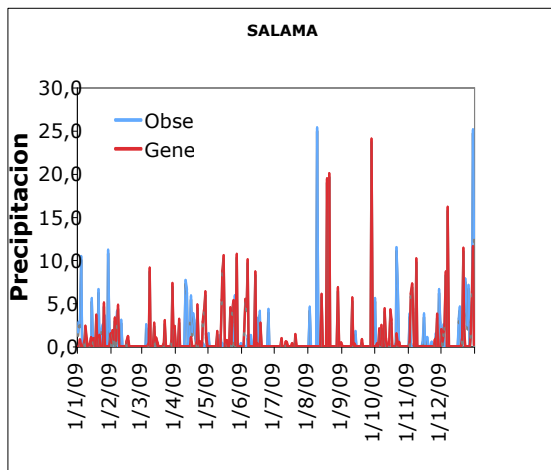
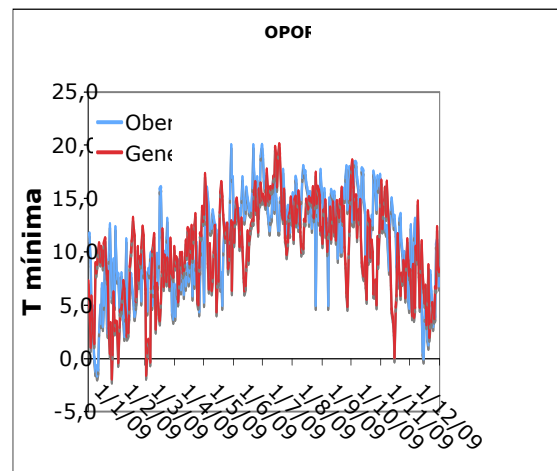
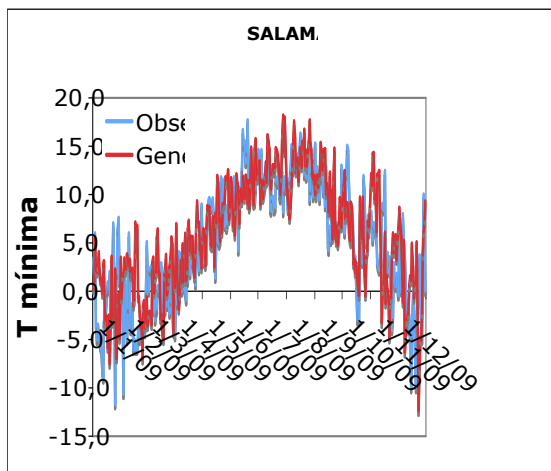
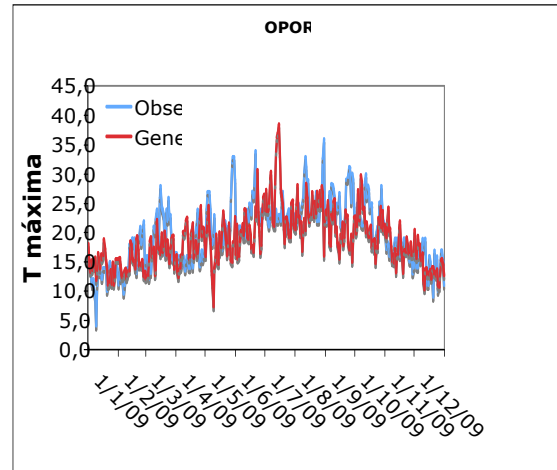
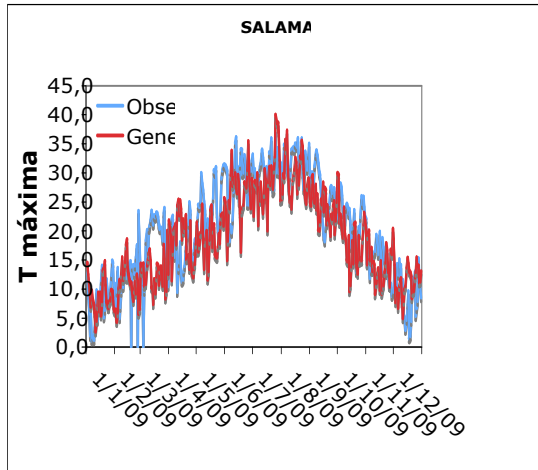


Figura 3. Evolución de las temperaturas extremas y de la precipitación observada y generada para el año 2009 en Salamanca.

Figura 4. Evolución de las temperaturas extremas y de la precipitación observada y generada para el año 2009 en Oporto.

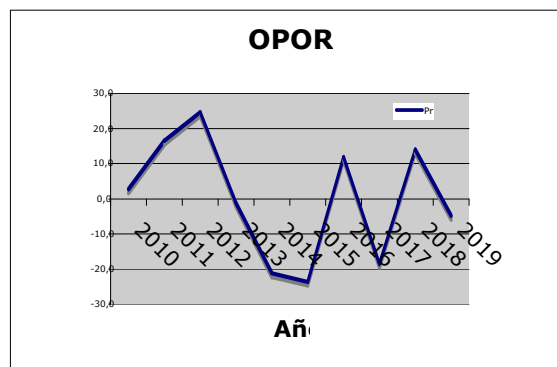
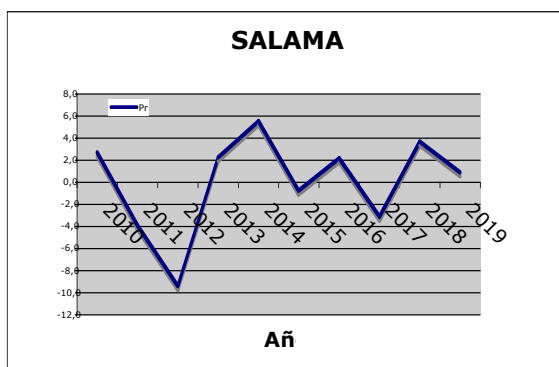
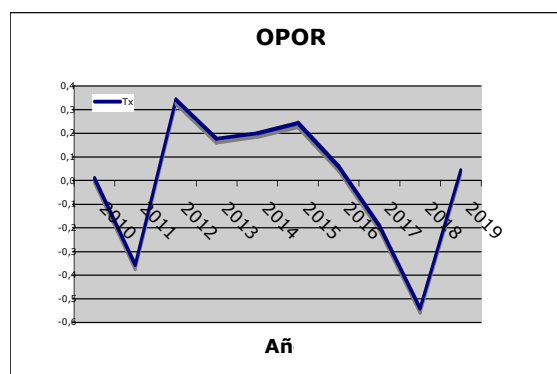
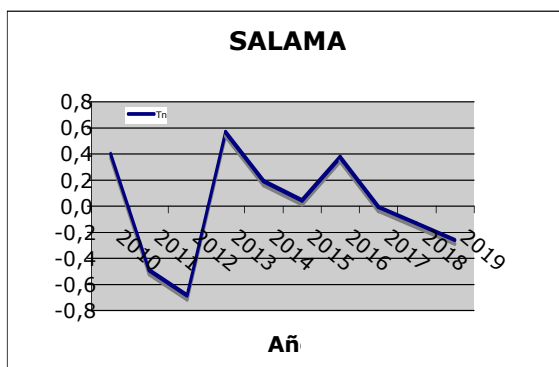
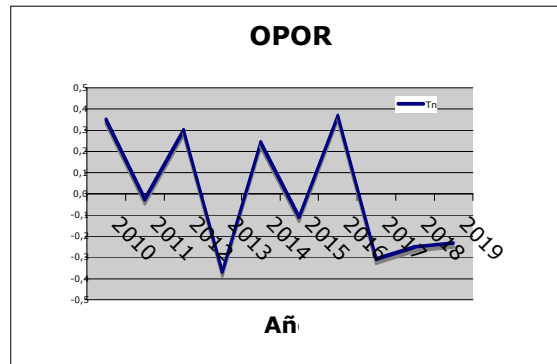
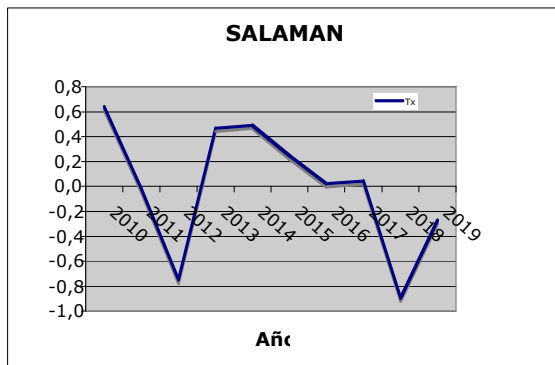


Figura 5. Evolución inter-anual (2010-2019) prevista por el modelo para las anomalías de las tres variables en Salamanca.

Figura 6. Evolución inter-anual (2010-2019) prevista por el modelo para las anomalías de las tres variables en Oporto

SALAMANCA

	En	Fe	Ma	Ab	My	Ju	Jl	Ag	Se	Oc	No	Di
Observada												
Nº días húmedos	330	290	284	378	377	220	121	113	196	343	306	325
Nº días secos	811	751	820	696	729	848	988	1001	882	747	727	775
Precipitación (mm)	30.5	25.8	22.3	35.7	46.4	35.6	14.2	14.9	28.9	47.8	39.1	41.5
Tª máxima (°C)	8.7	11.3	14.5	16.2	20.3	26.2	29.8	29.3	25.2	18.7	12.8	9.3
Desv. estandar	3.5	3.7	4.2	4.5	4.9	4.8	4.2	3.9	4.7	4.3	3.9	3.6
Tª mínima (°C)	-0.5	0.2	1.8	3.8	7.2	10.8	12.7	12.5	9.9	6.3	2.2	0.5
Desv. estandar	3.9	3.8	3.5	3.1	3.1	2.8	2.7	2.6	3.1	3.5	4.3	4.5
Rad. Solar (MJ/m2)	6.6	10.5	14.7	18.8	22.1	26.0	26.1	23.1	17.4	11.4	7.4	5.8
Desv. estandar	2.7	3.5	4.3	5.2	5.9	4.3	4.0	3.9	4.3	4.0	2.9	2.2
Vel. Viento (m/s)	3.1	3.4	3.6	3.9	3.5	3.1	2.8	2.6	2.5	2.9	2.8	3.2
Desv. estandar	2.6	2.6	2.3	2.1	1.8	1.5	1.3	1.3	1.5	2.2	2.2	2.6
Generada												
Nº días húmedos	312	309	311	356	406	227	152	131	220	329	318	386
Nº días secos	835	736	836	754	741	883	995	1016	890	818	792	761
Precipitación (mm)	27.6	29.6	25.6	34.3	45.1	39.0	19.1	18.3	29.7	43.7	36.0	44.6
Tª máxima (°C)	8.9	11.3	14.3	15.9	19.9	25.8	29.6	29.6	25.4	18.8	13.2	9.8
Desv. estandar	3.5	4.2	4.1	4.5	4.9	4.8	4.2	4.3	4.9	4.9	4.2	3.5
Tª mínima (°C)	-0.5	0.9	1.5	3.5	7.2	10.7	12.6	12.7	10.0	6.0	2.3	0.6
Desv. estandar	3.9	3.8	3.5	3.1	3.1	2.7	2.7	2.7	3.2	3.7	4.4	4.4
Rad. Solar (MJ/m2)	6.7	10.3	14.3	18.8	21.4	25.4	25.7	23.0	17.2	11.3	7.4	5.6
Desv. estandar	2.6	3.4	4.2	4.9	5.9	4.3	3.9	3.9	4.2	3.9	2.9	2.1
Vel. Viento (m/s)	3.1	3.5	3.7	3.9	3.5	3.2	2.8	2.6	2.4	2.8	2.9	3.2
Desv. estandar	2.5	2.6	2.3	2.1	1.8	1.5	1.4	1.3	1.4	2.1	2.2	2.5

OPORTO

	En	Fe	Ma	Ab	My	Ju	Jl	Ag	Se	Oc	No	Di
Observada												
Nº días húmedos	504	450	409	445	388	225	148	141	256	463	449	503
Nº días secos	627	589	697	626	711	836	958	963	819	647	608	607
Precipitación (mm)	137.5	110.8	95.3	104.7	82.5	38.6	21.7	27.1	62.3	135.4	153.3	160.6
Tª máxima (°C)	13.9	14.9	16.7	17.6	19.3	22.5	24.1	24.4	23.4	20.2	16.7	14.6
Desv. estandar	2.2	2.6	3.3	3.3	3.6	4.0	3.9	3.5	3.6	3.2	2.9	2.3
Tª mínima (°C)	5.8	6.4	7.5	8.7	10.7	13.4	14.5	14.4	13.7	11.5	8.6	6.7
Desv. estandar	3.6	3.5	3.1	2.9	2.7	2.6	2.2	2.5	2.6	3.0	3.6	3.7
Rad. Solar (MJ/m2)	6.8	9.3	13.6	17.7	20.6	23.1	23.4	21.1	16.0	10.6	7.3	5.6
Desv. estandar	3.1	4.1	5.1	6.3	6.5	6.5	6.2	5.2	5.0	4.2	3.2	2.7
Vel. Viento (m/s)	3.5	3.4	3.5	3.5	3.4	3.1	2.9	2.7	2.7	3.0	3.2	3.6
Desv. estandar	1.9	1.9	1.7	1.5	1.5	1.2	1.1	1.1	1.4	1.7	1.7	2.1
Generada												
Nº días húmedos	445	442	388	451	417	244	154	144	276	482	439	480
Nº días secos	702	603	759	659	730	866	993	1003	834	665	671	667
Precipitación (mm)	118.5	104.8	84.2	104.8	73.6	40.4	18.4	26.8	65.5	129.9	139.5	150.7
Tª máxima (°C)	13.9	14.8	17.0	17.8	19.3	22.4	23.9	24.5	23.3	20.5	16.9	14.8
Desv. estandar	2.3	2.5	3.6	3.7	3.8	4.1	3.9	3.6	3.8	3.4	2.9	2.3
Tª mínima (°C)	5.5	6.2	7.5	8.6	10.8	13.4	14.4	14.5	13.4	11.6	8.5	7.0
Desv. estandar	3.6	3.5	2.9	3.1	2.9	2.6	2.3	2.6	2.7	3.0	3.7	3.6
Rad. Solar (MJ/m2)	6.8	9.4	13.7	17.7	20.2	22.9	23.1	20.7	16.0	10.6	7.2	5.6
Desv. estandar	2.9	3.8	4.9	5.8	5.9	6.1	5.5	5.0	4.9	4.1	3.1	2.5
Vel. Viento (m/s)	3.6	3.7	3.4	3.5	3.4	3.1	2.9	2.8	2.7	3.0	3.2	3.7
Desv. estandar	1.9	1.9	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.4	1.6	1.8	2.1

Tabla 1. Estadística descriptiva de las series observadas y generadas para el periodo 1973-2008, en Salamanca y Oporto

